

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

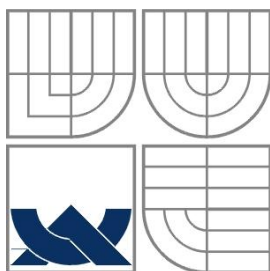
## ROTOPEĐ PRO NABÍJENÍ AKUMULÁTORU

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

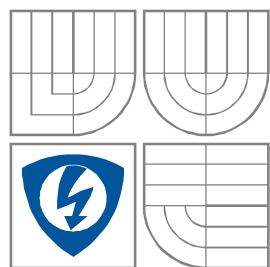
Jan Nekvapil

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A  
KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNologiÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY  
A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC  
ENGINEERING

## ROTOPED PRO NABÍJENÍ AKUMULÁTORU

EXERCISE BICYCLE FOR ACCUMULATOR CHARGING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Jan Nekvapil

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. Jan Knobloch

BRNO, 2014

### **Bibliografická citace**

NEKVAPIL, J. *Rotoped pro nabíjení akumulátoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 28 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Knobloch.

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Rotoped pro nabíjení akumulátoru jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne .....

Podpis autora .....

## **Poděkování**

Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Janu Knoblochovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování této bakalářské práce. Také bych chtěl zde poděkovat panu Ing. Daliboru Červinkovi, Ph.D.

V Brně dne .....

Podpis autora .....

# Obsah

ÚVOD .....	8
<b>1 AKUMULÁTOR .....</b>	<b>8</b>
<b>1.1 POPIS AKUMULÁTORU .....</b>	<b>8</b>
<b>1.2 ROZDĚLENÍ OLOVĚNÝCH AKUMULÁTORŮ .....</b>	<b>9</b>
1.2.1 DĚLENÍ PODLE TYPU .....	9
1.2.2 DĚLENÍ PODLE DRUHU .....	9
<b>1.3 ZÁKLADNÍ PARAMETRY A VLASTNOSTI AKUMULÁTORU .....</b>	<b>10</b>
1.3.1 JMENOVITÁ KAPACITA AKUMULÁTORU .....	10
1.3.2 VNITŘNÍ ODPOR AKUMULÁTORU .....	10
1.3.3 SAMOVYBÍJENÍ .....	10
1.3.4 SULFATAČE ELEKTROD .....	11
1.3.5 ZKRATY .....	11
<b>1.4 NABÍJENÍ AKUMULÁTORU .....</b>	<b>11</b>
1.4.1 NABÍJENÍ AKUMULÁTORU .....	11
1.4.2 U CHARAKTERISTIKA .....	12
1.4.3 I CHARAKTERISTIKA .....	12
1.4.4 W CHARAKTERISTIKA .....	12
1.4.5 TEPLOTNÍ KOMPENZACE .....	12
<b>2 BLDC MOTOR .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1 POPIS BLDC MOTORU .....</b>	<b>12</b>
2.1.1 BLDC MOTOR JAKO GENERÁTOR .....	13
<b>3 MĚNIČE ELEKTRICKÝCH VELIČIN .....</b>	<b>13</b>
<b>3.1 NEŘÍZENÝ USMĚRŇOVAČ .....</b>	<b>14</b>
<b>3.2 AKTIVNÍ USMĚRŇOVAČ .....</b>	<b>14</b>
<b>3.3 STEJNOSMĚRNÝ MEZIOBVOD .....</b>	<b>15</b>
<b>3.4 ZVYŠUJÍCÍ MĚNIČ NAPĚTÍ .....</b>	<b>15</b>
<b>4 NÁVRH KONCEPCE ZAŘÍZENÍ .....</b>	<b>16</b>
<b>4.1 VÝBĚR VHODNÉHO MOTORU A SOUČÁSTEK .....</b>	<b>16</b>
<b>4.2 ZHODNOCENÍ ZPŮSOBU PROVEDENÍ ELEKTRICKÉ ČÁSTI .....</b>	<b>17</b>
<b>4.3 SCHÉMA .....</b>	<b>18</b>
4.3.1 SOUPIS SOUČÁSTEK: .....	19
<b>4.4 VÝBĚR VHODNÝCH SOUČÁSTEK .....</b>	<b>19</b>
4.4.1 DIODOVÝ USMĚRŇOVAČ .....	19
4.4.2 STEP-UP MĚNIČ .....	20
<b>4.5 MODELOVÝ VÝPOČET ZTRÁT VEDENÍM A PŘEPÍNACÍCH ZTRÁT .....</b>	<b>24</b>
<b>5 SROVNÁNÍ S PODOBNÝMI ZAŘÍZENÍMI .....</b>	<b>25</b>
<b>6 ZÁVĚR .....</b>	<b>27</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>28</b>

## Seznam obrázků

Obrázek 3-1 .....	14
Obrázek 3-2 .....	15
Obrázek 3-3 .....	15
Obrázek 3-4 .....	16

# ÚVOD

V předkládané bakalářské práci je proveden návrh elektrické části zařízení. Tato ve spojení s BLDC motorem, řetězovým převodem a rotopedem vytvoří zdroj elektrické energie. Práce se formálně dělí na teoretickou a praktickou část. Teorii je podpořen návrh možného zapojení v programu Eagle.

Motivací pro zkonstruování takového přípravku je více. Za prvé je to jiný zdroj pro ostrovní síť v rámci chaty apod., kde sice dnes existuje mnoho možností, jak elektrickou energii vyrobit (elektrocentrály, fotovoltaika), na druhou stranu rotoped může být tou nejlevnější a velmi pružnou variantou, pokud nepotřebujeme velké množství energie. Za druhé je škoda energii při cvičení zbytečně mařit na teplo, pokud existuje dostupný způsob její přeměny a uložení. Následně ji využít například pro přístroje, které jí sice mnoho nespotřebují, ale jejich provozem získá využitá energie velkou přidanou hodnotu. Například nabíjením drobné elektroniky a popř. i provozem notebooku. Dalším přínosem bude určitý vývoj změny pohledu a představ cvičence o množství elektrické energie, které při běžných činnostech spotřebovává. A tudíž si jí třeba začne více vážit a uvážlivěji používat.

## 1 AKUMULÁTOR

### 1.1 Popis akumulátoru

Olověný akumulátor je elektrochemický zdroj energie. Jeho základní součástí jsou dvě olověné elektrody (desky) ponořené v elektrolytu. Ten je tvořen kyselinou sírovou, která je zředěná destilovanou vodou v určitém poměru. Olověné desky tvoří póly článku. Po ponoření elektrod do elektrolytu se na jejich povrchu vytvoří vrstva síranu olovnatého. Připojením svorek na zdroj elektrického napětí začneme akumulátor nabíjet a probíhá nyní chemická reakce. Na katodě se  $\text{PbSO}_4$  začne rozpouštět a na anodě hromadit. Na anodě dojde k přeměně  $\text{PbSO}_4$  na  $\text{PbO}_2$ . Je-li akumulátor plně nabitý, pak aktivní hmotou na jedné z elektrod je olovo a na druhé oxid olovičitý. (Pozn. Názvy elektrod katoda a anoda používáme pouze se současným uvedením směru protékajícího proudu. Při nabíjení dochází k oxidaci (anodické reakci) na kladném pólu a k redukci (reakci na katodě) na pólu záporném. Při vybíjení si chemická reakce vymění působiště. Při nabíjení je anodou kladný pól, při vybíjení akumulátoru pól záporný. [1])

Je to historicky velmi často používaný akumulátor, který je ale dnes v mnoha aplikacích poněkud nepraktický a je nahrazován jinými typy akumulátorů. Setkáme se s ním v podobě autobaterie, uvnitř malé UPS pro jeden počítač, či záložní zdroje pro alarmy a v neposlední řadě také jako se zdrojem pro dětské samohyby. Jeho předností je nepochybně cena a jednoduchost provedení a obsluhy. Zápornou stránkou věci je jeho hmotnost a kvůli ní také nejnížší hmotnostní hustota energie. Ta činí pouze 0,03 KWh/kg. Pro náš případ je však autobaterie vhodným řešením a to především kvůli konstrukci akumulátoru pro vysoké a krátkodobé nabíjecí proudy.



## 1.2 Rozdělení olověných akumulátorů

Olověné akumulátory můžeme rozdělit podle jejich provedení i podle účelu, ke kterým jsou určeny. Dalším možným dělením je podle nutnosti provádět údržbu. Ta je velmi jednoduchá a spočívá v udržování čistoty svorek, jejichž zoxidovaná vrstva negativně ovlivňuje přechodový odpor a znesnadňuje vydání energie z akumulátoru. A dále je třeba pohlídat hladinu elektrolytu v baterii, která se snižuje v důsledku odparu a rozkladu vody na plynný vodík a kyslík.

### 1.2.1 Dělení podle typu

#### Akumulátory se zaplavenými elektrodami

Typ, se kterým se nejčastěji setkáme, je akumulátor se zaplavenými elektrodami. Známe jej jako běžnou autobaterii. Baterie je složena z tří, či šesti článků zapojených v sérii. Napětí jednoho článku je 2,1V. Součtem tedy 6,3V nebo 12,6V. Elektrody takových akumulátorů jsou ve formě mřížek, na nichž je nanесena aktivní hmota. Konstituce a materiál složení mřížek jsou v neustálém vývoji. Konstituce mřížek ovlivňuje velikost akumulátoru a jeho maximální startovací proud. Složení materiálu mřížek pak jejich pevnost a odolnost proti otřesům a zejména velikost samovybíjení.

#### Akumulátory s vázaným elektrolytem v separátoru

V tomto typu akumulátorů je elektrolyt nasáknut do separátoru, který je tvořen skelným vláknem. Výhodou separátoru je pevné vyplnění celého prostoru mezi elektrodami a tím zabránění doteku mřížek. Dále separátor poněkud zamezuje drolení aktivní hmoty. Takový akumulátor je bezúdržbový, nedoléváme destilovanou vodu. Díky vysoké kapilaritě separátoru nedojde při převržení akumulátoru k úniku elektrolytu.

#### Akumulátory gelové

Jedná pouze o jinou formu elektrolytu v akumulátoru. Tento akumulátor je hermeticky uzavřený a díky tomu vhodný do vnitřních prostor. Nehrozí ani vylití elektrolytu. Elektrolyt je tvořen zředěnou kyselinou sírovou vázanou v gelu z oxidu křemičitého, popř. s dalšími příměsmi. Akumulátor je vybaven tlakovým ventilem, který v případě nadměrného vývinu plynů vypustí přetlak, aby nedošlo k explozi akumulátoru. Tímto však dochází k poškození baterie. Tento ventil udržuje uvnitř baterie přetlak 100 – 400 kPa. Takový přetlak je nutný k chemické reakci s katalyzátorem, zpětného sloučení vodíku a kyslíku na vodu. Takový akumulátor nazýváme také rekombinační (VRLA – Valve Regulated Lead Acid). Nevýhodou gelového akumulátoru jsou nižší možné dobíjecí proudy. Přibližně poloviční oproti výše zmíněným typům, tedy cca 0,05 násobek kapacity.

### 1.2.2 Dělení podle druhu

#### Akumulátory startovací

Autobaterie, které už podle názvu jsou konstruovány tak, aby i při nízkých teplotách dokázaly ze sebe po krátký čas vydat co nejvíce energie pro roztočení spalovacího motoru. Tomu je přizpůsobená i vnitřní konstrukce akumulátoru, s co největší možnou plochou elektrod. Větší četnost tenčích mřížek s aktivní hmotou. Akumulátor tudíž dobře snáší cykly

přízpůsobené dnešní dopravě na krátké vzdálenosti. Velké krátkodobé vybíjecí proudy a krátká intenzivní nabíjení z alternátoru s udržováním akumulátoru v nabitém stavu. Odvrácenou stranou větší hustoty mřížek v článku akumulátoru je vyšší hodnota samovybíjení oproti trakčnímu akumulátoru. Ve startovací baterii dojde k nevratnému poškození elektrod jejich zkroucením v důsledku hlubokého vybití již v řádu několika dní a sulfatací, neboli vznikem síranu olovnatého, který obalí aktivní plochu elektrody. Baterie není určena pro dlouhodobé napájení nízkoodběrových zařízení. Z důvodu velké citlivosti na hloubku vybití.

### **Akumulátory trakční**

Tyto akumulátory jsou určeny pro dlouhodobé zatížení spotřebičem. Jinak se nazývají cyklické. Cyklus nabití a vybití snášejí cca 1500x podle hloubky vybití. Baterii je možné odebrat až do 80% uložené energie bez trvalých následků, což u baterie startovací nelze. Tyto baterie rovněž nejsou konstruovány pro intenzivní nabíjení, potřebují kontrolovaný a regulovaný nabíjecí proces.

## **1.3 Základní parametry a vlastnosti akumulátoru**

### **1.3.1 Jmenovitá kapacita akumulátoru**

Je to hodnota udávaná v Ah a označujeme ji C. V dolním indexu C je počet hodin zatížení akumulátoru, pro které je kapacita udávaná. Většinou se udává pro zatížení akumulátoru po dobu 20 nebo 10 hodin. Různé metody zjišťování kapacity popisují normy. Podle norem EN je teplota akumulátoru při měření 25°C a měření probíhá do doby, kdy klesne napětí na jednom článku na hranici 1,5V. Dále je možné setkat se s označením rezervní kapacita RC, která se počítá v minutách. Udává dobu trvání, kterou je akumulátor schopen snést zatížení proudem 25A. Napětí na článku klesá pouze do 1,75V.

Jmenovitá kapacita popisuje akumulátor při specifických podmínkách a zatížení. Reálná využitelná kapacita je závislá nejen na stavu akumulátoru a teplotě, ale hlavně na velikosti připojené zátěže a hloubce vybití. Proto při růstu zatěžovacího proudu klesá využitelná kapacita baterie.

### **1.3.2 Vnitřní odpor akumulátoru**

Udávaný většinou v mΩ. Nový akumulátor má velikost cca v jednotkách mΩ. Čím menší vnitřní odpor, tím tvrdší zdroj. Velikost vnitřního odporu závisí na stáří akumulátoru, počtu cyklů, které již absolvoval. Dále pak na stavu nabití. Při nabíjení se odpor zmenšuje a při vybíjení se zvětšuje. Nabíjený akumulátor má přibližně poloviční odpor vybitého. Vnitřní odpor je závislý na teplotě elektrolytu. Mění se o 4%°C<sup>-1</sup>. [2]

### **1.3.3 Samovybíjení**

Je to nešvar všech akumulátorů, jehož velikost však konstrukcí a použitými materiály můžeme v dostatečné míře ovlivnit. Akumulátor je termodynamicky nestálou soustavou, jejíž elektrody mohou volně reagovat s roztokem za současného vyvíjení plynů. Dále může oxid olovičitý reagovat s olovenou mřížkou. Velikost samovybíjení ovlivňují také tyto vlivy. Vnější vlivem je teplota. S rostoucí teplotou se zvyšuje hodnota samovybíjení. Také se zvyšující se koncentrací kyseliny sírové roste samovybíjení. Čistotu elektrolytu můžeme ovlivňovat. Je snahou výrobce, aby v elektrolytu nezůstaly žádné zbytky solí, které by

usnadňovaly neustálou ztrátu nabité energie. Ovšem výrobce také určuje složení materiálu mřížek, na nichž je aktivní hmota. Obsahují-li mřížky příměsi antimonu, ten se korozi kladné elektrody rozpouští do elektrolytu a usazuje se na aktivní hmotě záporné elektrody. Tato úsada pak zjednodušuje vývin vodíku. Akumulátory starší konstrukce trpěly samovybíjením velikosti 1% své kapacity denně. Dnešní akumulátory, které obsahují ve svých mřížkách vápník, dosahují pouze třetinové velikosti samovybíjení.

### 1.3.4 Sulfatace elektrod

Vzniká při skladování akumulátoru ve vybitém stavu, či při systematickém nedostatečném dobíjení akumulátoru. Je to tvorba síranu olovnatého při vybíjení akumulátoru. Na mřížkách se usazuje ve formě jemných krystalek, které se později přeměňují, zvětšují, až vytvoří tvrdou hrubou vrstvu síranu na aktivní hmotě elektrody. To z důvodu přednostní vazby dalšího síranu olovnatého na již vzniklá krystalizační jádra. Sírany, jinak také sulfáty, zmenšují účinnou plochu elektrod. Tyto plochy se pak nemohou zúčastnit elektrochemické reakce. Dochází tudíž ke snížení kapacity za současného zvýšení vnitřního odporu. K sulfataci dochází při hlubokém vybití, tzn. pod napětí 10,5V, a současně vysoké nabíjecí a vybíjecí proudy. Další nevýhodou je prostorová náročnost krystalů, které mohou způsobit rozeprání, zlomení mřížek a odpadávání aktivní hmoty. Prevencí pro akumulátor je pravidelné dobíjení akumulátoru.

### 1.3.5 Zkraty

V mezimřížkovém prostoru. Příčinou je bouřlivý vývin plynů při špatném způsobu nabíjení akumulátoru příliš vysokým proudem. Dále je to nerovnoměrný nárůst aktivní hmoty na mřížku, přičemž může dojít k dotyku mezi elektrodami.

## 1.4 Nabíjení akumulátoru

### 1.4.1 Nabíjení akumulátoru

Při nabíjení zcela vybitého olověného akumulátoru složeného z šesti článků vzrůstá jeho napětí ve třech pásmech. V prvním pásmu dochází k tvorbě kyseliny sírové v pórech olověných desek a napětí v této chvíli stoupá až na 13,2V, hustota elektrolytu dosahuje  $1,15\text{gcm}^{-3}$ . Při přechodu do druhého pásma začne probíhat přeměna síranu olovnatého až do napětí 14,7V a současného zvýšení hustoty elektrolytu na  $1,25\text{gcm}^{-3}$ . Po překročení hraničního napětí ve druhém pásmu pokračujeme c nabíjení v pásmu třetím. Zde se kromě síranu olovnatého začne rozkládat i voda na vodík a kyslík, baterie plynuje. Hustota elektrolytu dosáhne na  $1,28\text{gcm}^{-3}$ . Při dalším dobíjení se již velikost napětí na akumulátoru nezvyšuje a veškerý výkon přivedený na baterii je spotřebován na elektrolyzu vody. Pokud začíná plynování akumulátoru při nižším napětí, než činí 14,4V, pak je akumulátor zasažen počínající sulfatací.

Při vybíjení nabitého akumulátoru ihned zprvu poklesne napětí na cca 12,6 – 12,8V. Hustota elektrolytu se začne snižovat a na povrchu elektrod vzniká síran olovnatý. Vybíjením se snižuje napětí až na hodnotu 10,5V, kterou považujeme za přípustnou dolní hranici napětí bez poškození akumulátoru. V tuto chvíli má elektrolyt hustotu pouze  $0,95\text{gcm}^{-3}$ , což může lehko vést v zimě k jeho zamrznutí a zničení baterie. [3], [4]

### **1.4.2 U charakteristika**

Jedná se o nabíjení akumulátoru konstantním napětím. Velikost napětí se volí blízko k hodnotě plynovacího napětí, které se pohybuje v rozmezí 14,4 – 14,8 V. Vhodné je určité proudové omezení, protože při začátku nabíjení dosahuje procházející proud velikosti cca 0,5 – 1 násobku jmenovité kapacity akumulátoru. Ovšem tento proud velmi rychle poklesne na rozumnou hodnotu (~0,1 násobek kapacity baterie). Se zvyšujícím se napětím akumulátoru klesá nabíjecí proud. Konečným nabíjecím proudem jsou jednotky % kapacity akumulátoru. Je dobré kontrolovat, když už ne teplotu elektrolytu, tak alespoň teplotu vnějšího obalu baterie. Průchodem vysokého proudu a možných závad v akumulátoru se elektrolyt silně zahřívá a je doporučeno nepřekročit teplotu 40°C. Klady nabíjení konstantním napětím jsou rychlost nabíjení, samoregulace nabíjecího proudu a tedy samostatné ukončení nabíjení akumulátoru. [3], [4]

### **1.4.3 I charakteristika**

K nabíjení konstantním proudem nejsou doporučena přenosná zařízení, kde těžko zjišťujeme hloubku vybití akumulátorů. Proud nastavujeme do jedné desetiny násobku jmenovité kapacity akumulátoru. Výhodou je snadný výpočet, popř. odhad, dodaného náboje do akumulátoru v závislosti na čase. Nevýhodou tohoto nabíjení je fakt, že dobíjíme neustále konstantním proudem, tudíž lehko dopustíme přebíjení akumulátoru. [3], [4]

### **1.4.4 W charakteristika**

Toto je kombinace obou předchozích řešení, přinášející zkrácení času potřebného k nabíjení. Zde se postupně zvyšuje napětí a snižuje dobíjecí proud. Tato nabíjecí charakteristika je označována jako „IU“ charakteristika. Jiným způsobem, zkombinovaným s W charakteristikou, je pulsní nabíjení. Toto také dokáže do určité míry zachránit zasulfátované akumulátory. [3], [4]

### **1.4.5 Teplotní kompenzace**

Jedná se o přizpůsobení velikosti napětí nabíječky při různé teplotě okolí a akumulátoru. Z důvodu závislosti rychlosti chemické reakce na teplotě je třeba na každé ochlazení o 10°C vůči referenční teplotě (nejčastěji 25°C) zvýšit napětí o cca 0,3V. Tímto nedopustíme neúplné dobití akumulátoru v zimním období. [4]

## **2 BLDC MOTOR**

### **2.1 Popis BLDC motoru**

BLDC (BrushLess DC motor) motor, neboli stejnosměrný motor s elektronickou komutací. Jinak také EC motor (Electronically commutated motor). Navenek se jedná o motor uživatelsky identický, jako je stejnosměrný motor. Rozdíl je v absenci mechanického sběracího ústrojí. Zde komutaci zajišťuje měnič vložený mezi stejnosměrný zdroj a motor. Tam, kde se dříve uplatňoval ss elektromotor nyní nalezneme EC motor. Je to z důvodu spolehlivosti stroje, který nepotřebuje údržbu, vyjma mazání ložisek. Ss motor ke svému chodu potřebuje kartáče, které se smykem po komutátoru opotřebovávají a je nutné je po určitém počtu provozních hodin vyměnit. Tím, že točivé elektrické pole nevzniká v rotoru, ale

ve statoru, tak je EC motor vůči ss motoru postaven obráceně. Existují navíc dvě varianty, inrunner a outrunner. V prvním případě máme pevně přichycený stator a rotor hřídelí točí se zátěží. Naopak je tomu v případě druhém, kdy je zátěž poháněna vnějším rotorem a hřídel je v tomto případě statickou částí motoru.

Provoz BLDC motoru je závislý na přesném spínání vinutí statoru. Vždy v motoru pracují pouze dvě ze tří vinutí. Aby měnič dostal signál a mohl rozhodnout, které vinutí zapnout a které vypnout, je nutné mít informaci o poloze natočení rotoru. Tato informace se získává pomocí více metod. Nejjednodušší metodou je měření indukovaného napětí na vypnutém vinutí. Tato metoda má však velkou nevýhodu, že neurčí počáteční natočení a nepříliš dobře funguje při malých otáčkách stroje. Jiným způsobem je rozmístění tří Hallovyh sond, které přesně určují natočení hřídele. Dalšími způsoby jsou použití resolverů a enkodérů. [8], [9], [10]

Zde však nebudu dále popisovat způsoby, které nebudeme používat.

Rozšíření tohoto typu motoru je závislý na ceně a vývoji velmi silných magnetů (nyní nejčastěji SmCo, NdFeB), které jsou jeho nejdražší součásti. Naleziště vzácných prvků jsou omezená svou těžitelností a státy, v nichž se doly nachází, vědí o strategické hodnotě těchto kovů. Proto nyní probíhá intenzivní vývoj magnetů s nižším obsahem prvků vzácných zemin a pokusy o recyklaci těchto prvků z elektroodpadu.

### **2.1.1 BLDC motor jako generátor**

BLDC může fungovat ve čtyřech různých pracovních režimech. Tyto pracovní stavy kreslíme pomocí čtyř kvadrantů V-A charakteristiky. Dvě z nich znázorňují motorický režim a druhé dvě generátorický režim. Pro rozhodnutí režimu motoru je důležitý směr proudu vzhledem ke svorkovému napětí na motoru. Odpovídá-li směr proudu, vůči svorkovému napětí, spotřebiči, jedná se o motorický režim. A naopak. Motorický chod je znázorněn I. a III. kvadrantem, generátorický II. a IV kvadrantem.

Motor je odporově-indukční zátěží. Do schématu jej zakreslujeme pomocí odporu, indukčnosti a zdroje vnitřního indukovaného napětí. [8]

Jelikož je naše pozornost soustředěna na generátorický režim, je vhodné zdůraznit, jak spolu souvisí veličiny popisující chod motoru. Otáčky hřídele jsou úměrné vnitřnímu indukovanému napětí. A proud do/z motoru je úměrný momentu na hřídeli. Otáčky motoru řídíme tedy velikostí střední hodnoty napětí. Motor můžeme řídit bipolárně, anebo unipolárně.

## **3 MĚNIČE ELEKTRICKÝCH VELIČIN**

Slouží k přeměně střídavých veličin v ideálním případě na stejnosměrné. Usměrňovače nejjednodušší, se síťovou komutací, nepotřebují pro uzavření polovodičových součástek vypínací obvody. Komutaci, tedy přenesení proudu na jinou součástku, způsobí průchod okamžité hodnoty síťového napětí nulou. Tato komutace se týká diod – neřízené usměrňovače a tyristorů – řízené usměrňovače. Kromě rozdělení na řízené a neřízené usměrňovače je můžeme dále dělit podle jiných kritérií. A sice na:

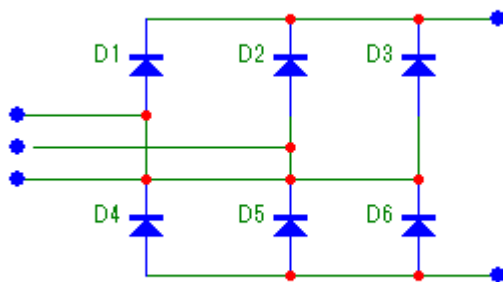
- podle počtu fází napájecí soustavy, 1-3 fázové,

- dle způsobu zapojení, můstkové a uzlové,
- podle způsobu usměrňování, 1- ,2- ,3- ,6- a vícepulsní
- podle použité polovodičové součástky - neřízené (složené z diod)
  - polořízené (diody + tyristory)
  - řízené plně (tyristory, tranzistory, SiC tranzistory)

Dále je v určitých aplikacích řadit za sebe dva a více měničů, toto nazýváme kaskádním řazením měničů. Je-li mezi nimi udržováno napětí stejnosměrným meziobvodem, pak tyto měniče nazýváme nepřímé. V našem případě se bude jednat o měnič nepřímý, obsahující ss meziobvod.

### 3.1 Neřízený usměrňovač

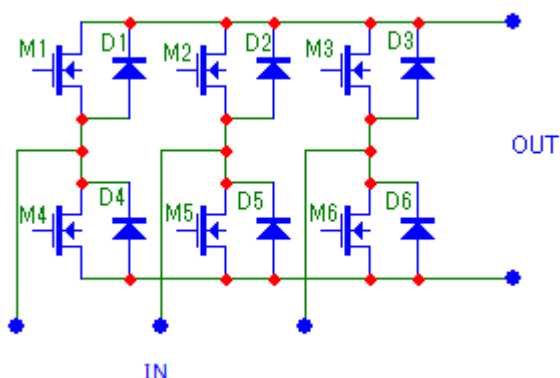
V tomto případě by se jednalo o použití šestipulsního můstkového diodového usměrňovače. Výhodou je jednoduchost zapojení bez dalších řídicích obvodů. Ovšem stejně budeme potřebovat regulovat množství odebírané energie a vložení neřízené části si v celkovém pohledu práci nezjednodušíme. Naopak zatížíme přenos energie do akumulátoru většími ztrátami a to úbytky na diodách. Tato možnost řešení však není zcela vyloučena.



Obrázek 3-1

### 3.2 Aktivní usměrňovač

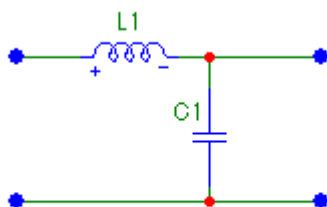
Jedná se o usměrňovač se stejným můstkovým zapojením, ale z plně říditelných součástek. Tranzistorů MOSFET s antiparalelními diodami. Výhodou takového řešení jsou nízké ztráty vedením, protože odpor kanálu otevřeného MOSFETu je v řádu mΩ. Dalším kladem je říditelnost odebíraného množství energie. Je možné řídit tento aktivní usměrňovač tak, aby zároveň využil indukčnosti vinutí motoru a plnil funkci zvyšujícího měniče (step-up měniče). To by bylo výhodné z toho hlediska, že na výstupu z motoru bude nízké napětí nevhodné pro přímé nabíjení akumulátoru.



Obrázek 3-2

### 3.3 Stejnosměrný meziobvod

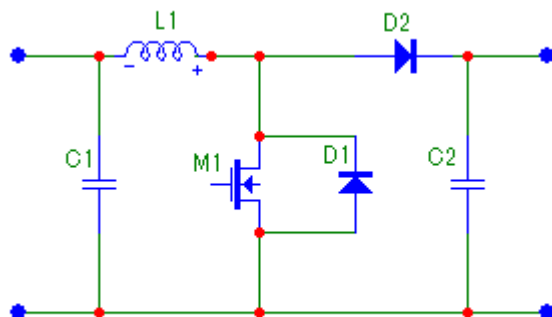
Usměrňovač je prvním stupněm přeměny kvality vstupující energie. Proto za ním následuje akumulátor energie, stejnosměrný meziobvod (dále ss meziobvod). Je obvyklé složit jej spojením kapacitoru a cívky. Tyto slouží ke stabilizaci velikosti napětí na výstupu z usměrňovače. Kapacitor i indukčnost vyhlazují zvlnění napětí. Není podmínkou, aby indukčnost byla včleněna do ss meziobvodu. A není možné, aby takto byl zapojen ss meziobvod bezprostředně za aktivní usměrňovač. To je z důvodu vysokého spínacího kmitočtu tranzistorů a tím vzniklých překmitů napětí na inštrukčnosti. Tyto by pak tranzistory spolehlivě zničily.



Obrázek 3-3

### 3.4 Zvyšující měnič napětí

V každém případě v návrhu použijeme step-up měnič, který zajistí zvýšení výstupního napětí. Princip funkce zvyšujícího měniče je založen na specifickém chování cívky při přerušení procházejícího proudu. Zmíněnému přerušení průchozího proudu se cívka brání zvýšením napětí. Abychom zajistili únosnou velikost ztrát energie, používáme k takovému přerušení tranzistor MOSFET. Za zmíněnou cívku je zapojena Schottkyho dioda v propustném směru, která zajistí propuštění energie dál při překročení napětí, na něž je nabit kondenzátor umístěný za diodou. Spínací frekvence takového step-up měniče se nastaví podle velikosti kondenzátoru v měniči (v našem případě  $f = 40 \text{ kHz}$ ). Při správné kombinaci velikosti indukčnosti, kapacity a spínací rychlosti tranzistoru, získáme zdroj s požadovaným napětím a tvrdostí.



Obrázek 3-4

## 4 NÁVRH KONCEPCE ZAŘÍZENÍ

### 4.1 Výběr vhodného motoru a součástek

Výběr motoru závisí na více požadavcích, omezeních. Zde uvedu úvahu vysvětlující výběr motoru. Cena je vždy až na prvním místě, proto by se zde nabízelo jednoduché řešení, použít asynchronní motor. Byl by plnohodnotným generátorem. Velikost AS motoru vůči BLDC motoru je větší. To by nám až tak nevadilo. Na druhou stranu by bylo nutné řízení skluzu AS motoru tak, aby pracoval v optimálním režimu, což je složitější, než při použití BLDC motoru. Jinou možností by bylo použít alternátor z automobilu, kterých je nepřeberné množství výkonů a s různými vhodnými pracovními otáčkami. Je to také schůdné řešení, na druhou stranu alternátor obsahuje kartáče a těm bychom se rádi vyhnuli. Jelikož zdrojem mechanické energie bude člověk, pak se snažíme o co nejvyšší účinnost přeměny energie. A z tohoto hlediska není alternátor vhodnou volbou. Jeho účinnost se pohybuje v rozmezí 55 – 65 %. Sběracího ústrojí bychom se nezbavili ani u ss motoru, proto se v tomto řešení nepoužije. Další možností je použít BLDC motor. Pro potřebný výkon je motorek menší oproti např. asynchronnímu motoru. Což může být i jeho nevýhodou z důvodu vysokých pracovních otáček, tedy ztrátách na převodu, a chlazení. Vhodnou variantou je tedy výběr modelářského, či méně otáčkového, většího, BLDC motoru.

V tomto duchu byl vybrán EC motor z elektrokola. A to z více důvodů. Za prvé se jednalo o převod, který by dosahoval při použití malého, avšak velmi výkonného modelářského motorku až 1:53 (0,019). To je velmi náročně proveditelné ozubenou převodovkou a plochým řemenem prakticky neřešitelné. Naproti tomu by u motoru z elektrokola převod dosahoval cca 1:3 (0,33), což není problém. Zvláště, když jsou motory v tabulce určeny pro namontování místo středu zadního kola bicyklu. To je výhodné pro montáž převodového kolečka. Dalším důvodem je neurčitost informace ohledně tepelných ztrát v modelářském motorku, který je konstrukčně navržen pro krátkodobý provoz na hranici výdrže. Naproti tomu je motor z elektrokola konstruován pro kontinuální provoz.

Dalším požadavkem je výkonnost cyklisty. Z dřívějších zkušeností je mi známo, že zdravý dospělý člověk je schopen po relativně dlouhou dobu při jízdě na kole vydávat



mechanický výkon kolem 200W. Budeme uvažovat relativně výkonovou rezervu a vybraný elektromotor má nejvyšší výkon 500W.

V následující tabulce jsou uvedeny parametry vybraných motorů:

**Tabulka 4-1**

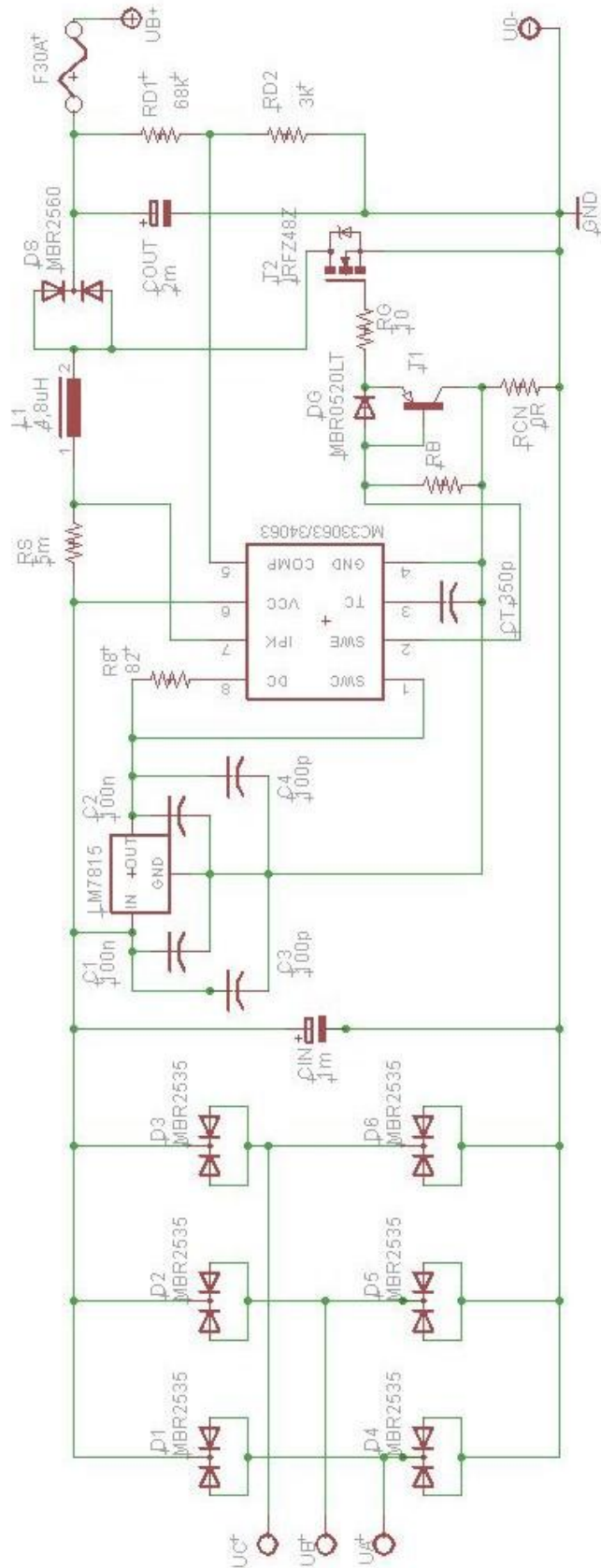
Tabulka vybraných motorů					
Číslo motoru		1		2	
Napětí motoru	$U_N$ [V]	24		36	
Otáčky naprázdno	$n_0$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	235,5		343,5	
Pracovní režim		$\eta_{\text{MAX}}$ [%]	$P_{2\text{MAX}}$ [W]	$\eta_{\text{MAX}}$ [%]	$P_{2\text{MAX}}$ [W]
Napětí	$U$ [V]	24,74	24,74	35,90	35,78
Proud	$I$ [A]	8,41	21,23	10,92	18,43
Příkon	$P_1$ [W]	208,00	525,30	392,40	659,70
Výkon	$P_2$ [W]	168,80	341,00	298,30	508,10
Moment	$M$ [Nm]	7,99	21,82	10,24	18,24
Otáčky	$n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	201,8	149,3	298,3	266,1
Účinnost	$\eta$ [%]	81,1	64,9	81,4	77,0
Ztráty v motoru	$\Delta P$ [W]	39,20	184,30	94,10	151,60
Převod	$k$ [-]	0,40	-	0,27	-

Uváděný převod  $k$  je pro frekvenci šlapání cvičence  $80 \text{ min}^{-1}$ . Na této hodnotě jsme se shodli se spolubydlícím, po odzkoušení na rotopedu. Převod je vyčíslen pro provoz motoru při nejlepší účinnosti. Hodnoty v tabulce jsou z technické dokumentace výrobce motorů a platí pro motorický režim. Oba motory obsahují Hallovy sondy, pro řízení zapínání vinutí. V našem případě tedy příkon dodá cyklista a výkon motor v generátorickém režimu vydá do měniče.

## 4.2 Zhodnocení způsobu provedení elektrické části

Elektrická část se v tomto návrhu prozatím sestává z diodového usměrňovače, na který navazuje stejnosměrný meziobvod se zvoleným kondenzátorem 1 mF. Kvůli zvlnění napětí by bylo lepší zvolit dvojnásobnou kapacitu, avšak počáteční nabíjecí proud by mohl zničit některou z diod. Za kapacitorem dále pokračuje skrze bočník  $5 \text{ m}\Omega$  a na něj navazující zvyšující blokuje měnič tvořený cívku s indukčností  $4,8 \mu\text{H}$  a tranzistorem MOS-FET. Ovládání tranzistoru má na starosti víceúčelový obvod MC34063. Spínací frekvence tranzistoru je nastavena časovacím kondenzátorem 350 pF na 40 kHz. Cívka je vzduchová. Návrhově má 17 závitů a je průměru 24 mm. Je zhotovena z lakovaného vodiče o průměru 0,9 mm a délka cívky je 12 mm.

### 4.3 Schéma



### 4.3.1 Soupis součástek:

- 1)  $D_1$ - $D_6$  MBR2535
- 2)  $C_{IN}$  1000 $\mu$ F, 50V, elektrolytický
- 3)  $C_1$ ,  $C_2$  100nF, 63V, keramický
- 4)  $C_3$ ,  $C_4$  100 $\mu$ F, 50V, elektrolytický
- 5) LM7815
- 6) MC34063
- 7)  $R_8$  82 $\Omega$
- 8)  $R_S \Delta P_z = 2W$ , 10m $\Omega$
- 9)  $C_T$  350pF
- 10)  $R_B$  5k $\Omega$
- 11)  $D_G$  MBR0520LT
- 12)  $T_1$  BC859
- 13)  $R_G$  10 $\Omega$
- 14)  $T_1$  IRFZ48Z
- 15)  $D_S$  MBR2560
- 16) L vlastní konstrukce 5 $\mu$ H
- 17)  $C_{OUT}$  2mF, 63V, elektrolytický
- 18)  $R_{D1}$  68k $\Omega$
- 19)  $R_{D2}$  3k $\Omega$
- 20) Držák pojistky typu Mini Blade, MCAST 30A 32V

## 4.4 Výběr vhodných součástek

Předpokládáme nižší napětí generátoru, než je požadované nabíjecí napětí. Proto použijeme variantu obsahující zvyšující měnič napětí. Pro tento účel byl využit obvod MC33064, který je vhodný pro konstrukci snižujícího, zvyšujícího i inverzního měniče. Tento obvod pracuje od napětí 3V až do 40V a obsahuje dva tranzistory v Darlingtonově zapojení s maximálním kolektorovým proudem 1,5A. V našem případě počítáme se spínáním vyššího proudu. Proto byl na výstup zapojen MOS-FET, který je obvodem spínán. Aby i při pomalém šlapání cvičence došlo ke spolehlivému sepnutí tranzistoru, byl do schématu zahrnut jednoúčelový obvod pro regulaci stejnosměrného napětí LM7815. Dále je obvod chráněn proti zkratu výstupních svorek rychlou 30A pojistkou. Akumulátory jsou zapojeny do série, aby lépe pojal výkon z měniče a proud se snížil na polovinu.

Pro jednotlivé celky jsem vybíral součástky pomocí níže rozepsaných úvah a výpočtů.

### 4.4.1 Diodový usměrňovač

Jedná se o šestipulsní usměrňovač. Diody jsou zvoleny s ohledem na výkon motoru a na předpokládaný tok energie. Motory máme vybrány dva a to pro různá napětí, avšak stejných výkonů. Při maximální spurtu cvičence a na druhé straně schopnosti akumulátorů zcela pojmout přiváděnou energii, motor na nižší napětí dodá proud o velikosti cca 21 A. Proto jsou diody voleny s rezervou na ustálený proud 30 A. Jsou to Schottkyho diody MBR2535CT.

Na usměrňovač navazuje elektrolytický kondenzátor 1000  $\mu$ F o maximálním napětí 50 V. Velikost kondenzátoru je menší, aby se zabránilo poškození diod při počátečním nabíjení.

#### 4.4.2 Step-up měnič

Skládá se z více celků, které popíšu jednotlivě. Srdcem měniče je víceúčelový obvod MC34063, který je možné použít i pro snižující, či invertující měnič. Tento obvod obsahuje i spínací tranzistory v Darlingtonově zapojení s maximálním kolektorovým proudem 1,5 A. To je pro náš účel nedostačující, proto je k obvodu přidán výkonový spínací tranzistor MOSFET, který je spínací částí obvodu ovládán. Aby se předešlo špatnému sepnutí výkonového tranzistoru, bylo potřeba přidat jednoúčelový regulátor napětí LM7815 s výstupem 15 V napájený proměnným napětím za usměrňovačem. Pro regulaci střídavého tranzistoru je obvod MC34063 vybaven dvěma vstupy informací o chování měniče. Bočník o velikosti 5 mΩ udává velikost průchozího proudu. Odporový dělič za zvyšujícím měničem udává napětí na stejnosměrném meziobvodu. V tomto případě na výstupu pro nabíjení akumulátoru. Nastavení napětí na výstupu závisí právě na napěťovém děliči. Velikost spínacího tranzistoru závisí na průchozím výkonu, rozdílu napětí před a za měničem a spínací frekvenci tranzistoru.

Zde je proveden výpočet k obvodu MC34063

##### Výpočet časovacího kondenzátoru:

Kde jednotlivé veličiny jsou označeny:

$$f = 40 \text{ kHz, kmitočet spínání}$$

$$V_{OUT} = 29,6V, \text{ napětí na výstupu měniče}$$

$$V_F = 0,65V, \text{ úbytek napětí na Schottkyho diodě}$$

$$V_{IN(MIN)} = 20V, \text{ minimální vstupní napětí}$$

$$V_{SAT} = cca 1V, \text{ úbytek napětí na tranzistorech v obvodu MC34063}$$

$$t_{ON} \text{ čas potřebný k sepnutí tranzistoru, [s]}$$

$$t_{OFF} \text{ čas potřebný k vypnutí tranzistoru, [s]}$$

$$C_T \text{ časovací kondenzátor, [F]}$$

$$C_T = 4 \cdot 10^{-5} \cdot t_{ON}$$

$$\frac{t_{ON}}{t_{OFF}} = \frac{V_{OUT} + V_F + V_{IN(MIN)}}{V_{IN(MIN)} - V_{SAT}}$$

$$\frac{t_{ON}}{t_{OFF}} = \frac{29,6V + 0,65V + 20,0V}{20,0V - 1,0V}$$

$$\frac{t_{ON}}{t_{OFF}} = 0,5384$$

$$(t_{ON} + t_{OFF}) = \frac{1}{f}$$

$$(t_{ON} + t_{OFF}) = \frac{1}{4 \cdot 10^4 \text{ Hz}}$$

$$(t_{ON} + t_{OFF}) = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}$$

$$t_{OFF} = \frac{(t_{ON} + t_{OFF})}{\frac{t_{ON}}{t_{OFF}} + 1}$$

$$t_{OFF} = \frac{2,5 \cdot 10^{-5} s}{0,5384 + 1}$$

$$t_{OFF} = 1,6250 \cdot 10^{-6} s$$

$$t_{ON} = (t_{ON} + t_{OFF}) - t_{OFF}$$

$$t_{ON} = 2,5 \cdot 10^{-5} s - 1,6250 \cdot 10^{-6} s$$

$$t_{ON} = 8,794 \cdot 10^{-6} s$$

$$C_T = 4 \cdot 10^{-5} \cdot 8,794 \cdot 10^{-6}$$

$$C_T = 3,5 \cdot 10^{-10} F$$

**Nyní výpočet bočnicku:**

$R_S$  odpor bočnicku, [ $\Omega$ ]

$I_{OUT(MAX)}$  maximální výstupní proud, [A]

$I_{pk(switch)}$  maximální proud pro určení spínacího prvku, [A]

$$R_S = \frac{0,3}{I_{pk(switch)}}$$

$$I_{OUT(MAX)} = \frac{P_{2(MAX)}}{V_{OUT}}$$

$$I_{OUT(MAX)} = \frac{325W}{29,6V}$$

$$I_{OUT(MAX)} \approx 11A$$

$$I_{pk(switch)} = 2 \cdot I_{OUT(MAX)} \cdot \left(\frac{t_{ON}}{t_{OFF}} + 1\right)$$

$$I_{pk(switch)} = 2 \cdot 11A \cdot (0,5384 + 1)$$

$$I_{pk(switch)} = 33,8448A$$

$$R_S = \frac{0,3}{33,8448A}$$

$$R_S = 8,8640 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$R_S \approx 10 \cdot 10^{-3} \Omega$$

**Výpočet kondenzátoru na výstupu ze zvyšujícího měniče:**

$$C_{OUT} = 9 \cdot \frac{I_{OUT(MAX)} \cdot t_{ON}}{V_{RIPPLE}}$$

$$C_{OUT} = 9 \cdot \frac{11A \cdot 8,7496 \cdot 10^{-6}s}{0,5000V}$$

$$C_{OUT} = 1,7324 \cdot 10^{-3}F$$

$$C_{OUT} \approx 2 \cdot 10^{-3}F$$

### Výpočet indukčnosti cívky:

$I_{ef(cívka)}$  efektivní hodnota proudu cívkou, [A]

$$L_{MIN} = \left( \frac{V_{IN(MIN)} - V_{SAT}}{I_{pk(switch)}} \right) \cdot t_{ON}$$

$$L_{MIN} = \left( \frac{20V - 1V}{33,8448A} \right) \cdot 8,7496 \cdot 10^{-6}s$$

$$L_{MIN} = 4,9120 \cdot 10^{-6}H$$

$$L_{MIN} \approx 5 \cdot 10^{-6}H$$

### Rozměry cívky a průměr vodiče:

$S_{Cu}$  průřez vodiče, [mm<sup>2</sup>]

$d_{Cu}$  průměr vodiče, [mm]

$$I_{ef(cívka)} = \frac{P_{2(MAX)}}{V_{IN(MIN)}} \cdot \sqrt{1 + \frac{\delta^2}{3}}$$

$$I_{ef(cívka)} = \frac{325W}{20V} \cdot \sqrt{1 + \frac{0,5^2}{3}}$$

$$I_{ef(cívka)} = 22,0026A$$

$$S_{Cu} = \frac{I_{ef(cívka)}}{\sigma}$$

$$S_{Cu} = \frac{22,0026A}{3A \cdot mm^{-2}}$$

$$S_{Cu} = 7,3342mm^2$$

$$d_{Cu} = 2 \cdot \sqrt{\frac{S_{Cu}}{\pi}}$$

$$d_{Cu} = 2 \cdot \sqrt{\frac{7,3342mm^2}{\pi}}$$

$$d_{Cu} = 2 \cdot \sqrt{\frac{7,3342 \text{ mm}^2}{\pi}}$$

$$d_{Cu} = 3,0558 \text{ mm}$$

Pro navinutí cívky je lepší použít vodič většího průřezu a to kvůli činiteli plnění. Pro činitel plnění blízký se jedné je nutno navinout cívku z vodiče čtvercového průřezu. Takto zvolená proudová hustota je nízká. Byla volena proto, aby byl úbytek napětí na cívce co nejmenší a tedy kvůli chlazení cívky.

**Z Wheelerova vztahu [12]:**

N počet závitů cívky, [-]

$r_{cívky}$  poloměr cívky (do poloviny tloušťky stěny cívky), [cm]

$l_{cívky}$  délka cívky (až do krajů), [cm]

$d_{vodiče}$  průměr vodiče, [cm]

$$L = \frac{0,41 \cdot N^2 \cdot r_{cívky}^2}{9 \cdot r_{cívky} + 10 \cdot l_{cívky}}$$

Poté zavedeme zjednodušující předpoklad:

$$2 \cdot r_{cívky} \approx l_{cívky}$$

$$N \cdot d_{vodiče} = 2 \cdot r_{cívky} + d_{vodiče}$$

$$r_{cívky} = \frac{d_{vodiče} - N \cdot d_{vodiče}}{2}$$

$$N = \sqrt{\frac{L \cdot (9 \cdot r_{cívky} + 10 \cdot (2 \cdot r_{cívky} + d_{cívky}))}{0,41 \cdot r_{cívky}^2}}$$

Pro konstrukci cívky je nutné použít jádro z feromagnetického materiálu. Při zvolených parametrech totiž vychází vzduchová cívka se 398 závitů.

**Výpočet odporového děliče:**

$V_{OUT}$  výstupní napětí měniče za Schottkyho diodou, [V]

$$V_{OUT} = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

$$\frac{V_{OUT}}{1,25} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$\frac{29,6V}{1,25V} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$23,68 \approx 1 + 22,67$$

$$R_1 = 3k\Omega$$

$$R_2 = 68k\Omega$$

## 4.5 Modelový výpočet ztrát vedením a přepínacích ztrát

Zde uvedu výpočet ztrát v součástkách pro nejhorší možný případ (předpokládám výkon elektrický výkon 350W a napětí 20V).

V případě A) vypočítám ztráty vedením diod.  
 $P_{\xi} = 6 \cdot \frac{1}{3} \cdot U_0 \cdot I_{max}$ , kde  $U_0$  je vyšší, než prahové napětí diody.

$I_{max}$  je procházející proud při maximálním výkonu motoru

$P_{\xi}$  je činný ztrátový výkon všech diod

$$U_0 = 0,9V$$

$$I_{max} = 17,5A$$

$$P_{\xi} = 6 \cdot \frac{1}{3} \cdot 0,9V \cdot 17,5A$$

$$P_{\xi} = 31,5W$$

Toto jsou poměrně vysoké ztráty pouze usměrněním.

Další ztráty vzniknou na spínači MOSFET ( $f_{spínací} = 40kHz$ )

Pro jednoduchost budu počítat  $I_{zdroje} = I_{max} = 17,5A$ ,  $s = 0,3$

Střída  $s = 0,3$

$$I_{střední} = I_{zdroje} \cdot s$$

$$I_{střední} = 17,5A \cdot 0,3$$

$$I_{střední} = 5,25$$

$$I_{efektivní} = I_z \cdot \sqrt{s}$$

$$I_{efektivní} = 17,5A \cdot \sqrt{0,3}$$

$$I_{efektivní} = 9,6A$$

Ztráty vedením MOSFET jsou tudíž

$P_{\xi} = R_{DSon} \cdot I_{ef}^2$ , kde  $R_{DSon} = 17,5m\Omega$  je odpor otevřeného kanálu tranzistoru

$$P_{\xi} = 17,5 \cdot 10^{-3}\Omega \cdot 9,6A^2$$

$$P_{\xi} = 1,61W$$

A na jeho nulové diodě  $s_{dioda} = 0,7$

$$I_s = I_z \cdot s_d$$

$$I_s = 17,5A \cdot 0,7$$

$$I_s = 12,25$$



$$P_{\xi} = I_s \cdot U_0$$

$$P_{\xi} = 12,25A \cdot 0,9V$$

$$P_{\xi} = 11,0W$$

### Přepínací ztráty tranzistoru

$P_{přep} = f_{spín} \cdot (W_{on} + W_{off})$ , kde  $(W_{on} + W_{off})$  je energie ztracená při jednom procesu zapnutí a vypnutí

$$(W_{on} + W_{off}) = \frac{1}{4} \cdot U_{spínané} \cdot I_{max} \cdot (t_{on} + t_{off})$$

$$(W_{on} + W_{off}) = \frac{1}{4} \cdot 24V \cdot 17,5A \cdot (12 + 44) \cdot 10^{-9}s$$

$$(W_{on} + W_{off}) = 5,88 \cdot 10^{-6}J$$

$$P_{přep} = f_{spín} \cdot (W_{on} + W_{off})$$

$$P_{přep} = 40 \cdot 10^3 Hz \cdot 5,88 \cdot 10^{-6}J$$

$$P_{přep} = 0,588W$$

Celkové ztráty na MOSFET s nulovou diodou jsou

$$P_{celkMOSFET} = P_{\xi dioda} + P_{přep} + P_{\xi vedení}$$

$$P_{celkMOSFET} = 11,0W + 0,588W + 1,61W$$

$$P_{celkMOSFET} = 13,2W$$

Tranzistor dokáže ze svého pouzdra předávat chladiči tepelný výkon 94W (při okolní teplotě 25°C), takže máme značnou rezervu.

## 5 SROVNÁNÍ S PODOBNÝMI ZAŘÍZENÍMI

Při vyhledávání informací jsem narazil na výrobky, které fungují na stejném principu, ale jejich užité hodnoty jsou značně rozdílné.

Výrobek německé firmy INNOVIT Eco Trainer Ergometer je plnohodnotný rotoped s nadstandardními funkcemi. Kromě údajů o ujeté vzdálenosti, tepu atd. lze na něm zvolit náhodný program, který trasu, zatížení, volí sám, či přímo zvolit terén, v němž by se cyklista pohyboval na kole. Technické parametry rotopedu jsou výrazně nižší oproti zde navrhované variantě. Za hodinu jízdy je možné vyrobit až 100 Wh, které lze uložit do baterie, která není specifikovaná kromě kapacity 500 Wh, anebo ji přímo využít k nabíjení, napájení přístrojů napětím 230 V, či USB 5 V. Počet tréninkových programů je 15. Převod je řešen plochým drážkovaným řemenem. Velikost zátěže je závislá na otáčkách. Jedinou slabinou tohoto výrobku je jeho poměrně vysoká cena stanovená na 1200 €.

The power plus od firmy Cougar je malý generátor s bezúdržbovým olověným akumulátorem 12V/7Ah. Jedná se pouze o spodní část rotopedu bez řídítek a sedátka. Stroj položíte na zem a sedíte při šlapání na židli. Tento výrobek je vybaven střídačem na 230 V

s max. výstupním výkonem 100 W a říditelným zdrojem malého napětí. Kromě toho obsahuje svítidlo a nabíječku, která akumulátor nabije ze sítě. Podle údaje doby nabití akumulátoru šlapáním (9 hod.) a použití bezúdržbového akumulátoru (VRLA) je výstupní elektrický výkon velmi malý. Nasvědčuje tomu i celoplastové provedení zařízení, vyjma klik šlapátek. Internetová cena dosahuje 101,6 £ (v přepočtu cca 3300 Kč).

Další výrobky podobného ražení zajišťují šlapáním pouze napájení sama sebe pro zobrazování údajů na displeji, což jsou odběry max. do jednotek Watt.

Tento případ respektuje vysoký nabíjecí proud pro akumulátory, proto budou použity obyčejné autobaterie, které je snášejí dobře. Tyto nejsou vhodné do vnitřních prostor. A to kvůli plynování, při přebíjení, a možného úniku elektrolytu. Avšak akumulátor budou připevněny ke kostře rotopedu tak, aby se případnému převržení předešlo. Nepřepokládám, že by akumulátory byly přebíjeny, tudíž můžeme plynování téměř vyloučit.

## 6 ZÁVĚR

Bakalářská práce uvádí možný způsob realizace části elektrického zařízení. Nepřímý měnič, který přebírá energii z EC motoru, se skládá z následujících částí:

První částí je usměrňovač, který je zde navržen jako jednoduchý diodový. Výhodou tohoto usměrňovače je samořiditelnost. Na druhé straně jednoduchá řešení nejsou vždy ideální a tento usměrňovač trpí velkými ztrátami díky prahovému napětí výkonových diod. V budoucnu, tedy v pokračování této práce, se uvažuje o použití aktivního usměrňovače, který by velikost ztrát značně eliminoval. Tento aktivní usměrňovač však bude potřebovat přesné řízení, resp. informaci o natočení rotoru. Tuto poskytnou Hallovy sondy, které jsou namontovány v motoru, a průmyslový celek, ovládající budiče tranzistorů aktivního usměrňovače na základě znalosti polohy rotoru. To však v dalším pokračování.

Druhou částí je pouze kapacitor. Je zvolen relativně malý a to z důvodu počátečního nabíjecího proudu, který by mohl poškodit některou z diod usměrňovače.

Na něj navazuje zvyšující měnič napětí, protože předpokládáme nižší napětí na výstupu z motoru, než je potřeba pro nabíjení dvou autobaterií v sérii. Tento step-up měnič je řízen obvodem MC34063A. Z důvodu vysokého spínacího proudu, na něj tranzistor v obvodu není dimenzován, je použit výkonový tranzistor MOSFET spínající vzduchovou cívku o indukčnosti  $4,8\mu\text{H}$ . Jednouúčelový obvod je vybaven snímáním výsledného napětí za měničem a to s pomocí odporového děliče. Výstupní napětí je zvoleno u horní hranice plynovacího napětí akumulátorů v sérii, tedy 29,6 V. Pro spolehlivé sepnutí výkonového tranzistoru je MC34063A napájen z napěťového regulátoru LM7815. Spínací kmitočet tranzistoru je nastaven kondenzátorem  $C_T = 350\text{ pF}$  na 40 kHz.

Oddělení od vyhlazovacího kondenzátoru obstarává Schottkyho dioda o úbytku cca 0,65 V při proudu 15 A. Dále už navazují nabíjené akumulátory.

Pro další pokračování je uvažován návrh desky plošných spojů, její osazení a oživení měniče. Následováno montáží rotopedu a změření reálných vlastností a možností.

## LITERATURA

[1] [online]. [cit. 2013-12-09]. Dostupné z: <http://www.battex.info/slovnicek-a-pojmy/katoda>

[2] HAMMERBAUER, Jiří. [online]. [cit. 2013-12-11]. 20 s. Dostupné z: <http://canov.jergym.cz/elektro/clanky2/olov.pdf>. DOPLNIT.

[3] MARCONI. *Skoro vše o akumulátorech a nabíjení: Aneb letem světem startovacích akumulátorů* [online]. 2008 [cit. 2013-12-11]. 61 s. Dostupné z: [http://www.motola.cz/UserFiles/Diskuzni\\_clanky/akumulatory.pdf](http://www.motola.cz/UserFiles/Diskuzni_clanky/akumulatory.pdf). Příručka.

[4] JELEČEK, Ondřej. *Nabíječka olověných akumulátorů*. Brno, 2013. 48s, 24 příloh. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Ing. Pavel Tošer.

[6] ŠIMON. ATAS ELEKTROMOTORY NÁCHOD A.S. *Elektro: BLDC aneb DC motor s nulovými náklady na údržbu*. Praha: FCC PUBLIC s. r. o., 2011, roč. 21, č. 10. ISSN 1210-0889. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/obsah-casopisu/46760.html>. Měsíčník. článkek str. 13-14.

[7] TOMÁŠEK, Zdeněk. *Konstrukce modelářského elektromotoru*. České Budějovice, 2007. 67 s. Dostupné z: [http://theses.cz/id/38nuxj/downloadPraceContent\\_adipIdno\\_6618](http://theses.cz/id/38nuxj/downloadPraceContent_adipIdno_6618). Bakalářská práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. Vedoucí práce Ing. Michal Šerý.

[8] HLOUŠ, Jaroslav. *Řídící jednotka pro malé DC motory s univerzálním softwarovým rozhraním*. Brno, 2008. 84 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Jaroslav Houška, Ph.D.

[9] BLAHA, Jan. *Návrh synchronního stroje s permanentními magnety*. Brno, 2013. 74 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Ondřej Vitek, Ph.D.

[10] NEVŘIVÝ, Tomáš. *Kompaktní měnič pro BLDC motor*. Brno, 2013. 62 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Petr Procházka, Ph.D.

[11] PATOČKA, Miroslav. *Výkonová elektronika: BVEL*. Brno, 2010. 140 s. Skriptum. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.

[12] ŠKRLA, Milan. *Výkonové tlumivky*. Brno, 2011. Diplomová práce. VUT BRNO. Vedoucí práce Doc. Dr. Ing. Miloslav Patočka.

Obrázek a technická dokumentace k součástkám

- [13] INTERNATIONAL RECTIFIER. Dostupné z: <http://www.ges.cz/sheets/i/irfz44n.pdf>
- [14] INTERNATIONAL RECTIFIER. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/213/181/irlz34n-datasheet-1.pdf>
- [15] VISHAY. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/223/046/mbr2545ct-datasheet-1.pdf>
- [16] YANGJIE. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/223/162/mbr3060ct-datasheet-1.pdf>
- [17] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 243 s. ISBN 80-860-5691-0.